

Технический проект ГДМЛ

П.А. Багрянский, В.Х. Амиров, В.Т. Астрелин, А.Д. Беклемишев, А.В. Брагин, А.В. Бурдаков, В.В. Вахрушев, И.А. Иванов, А.А. Касатов, Е.Ю. Колесников, И.А. Котельников, В.В. Максимов, С.В. Мурахтин, П.В. Зубарев, Д.И. Пилипенко, Е.И. Пинженин, С.В. Полосаткин, В.А. Попов, В.В. Поступаев, В.В. Приходько, Г.А. Рыжков, Д.И. Сковородин, Е.И. Солдаткина, А.Л. Соломахин, А.В. Сорокин, А.В. Судников, В.М. Сыроватин, А.Д. Хильченко, М.С. Христо, Д.Е. Черепанов, И.С. Черноштанов, Е.А. Шмигельский, А.А. Шошин, *Г.Г. Денисов, *М.Ю. Глявин, *А.В. Палицин, *М.Д. Проявин, *Д.И. Соболев, *М.В. Морозкин, *А.Г. Шалашов, *Е.Д. Господчиков, *Т.А. Хусаинов, **Д.А. Коломенцева, **Э.Ш. Магоммедов, **М.Е. Мойзых, **В.И. Щербаков

ИЯФ СО РАН, Новосибирск

**ИПФ РАН, Нижний Новгород*

***ООО «СуперОкс», Москва*



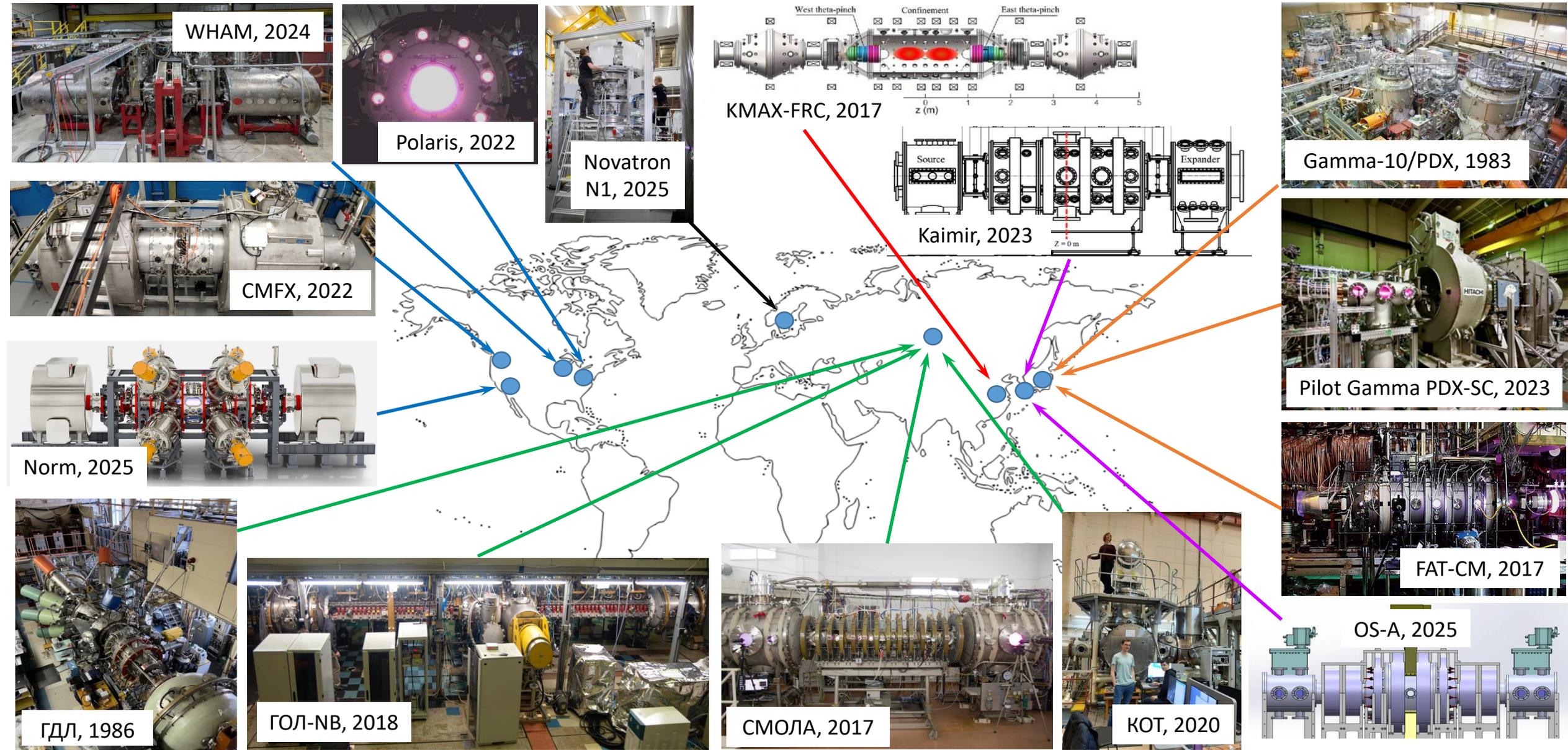
СуперОкс

Выполняется при поддержке федерального проекта «Технологии термоядерной энергетики»

План доклада

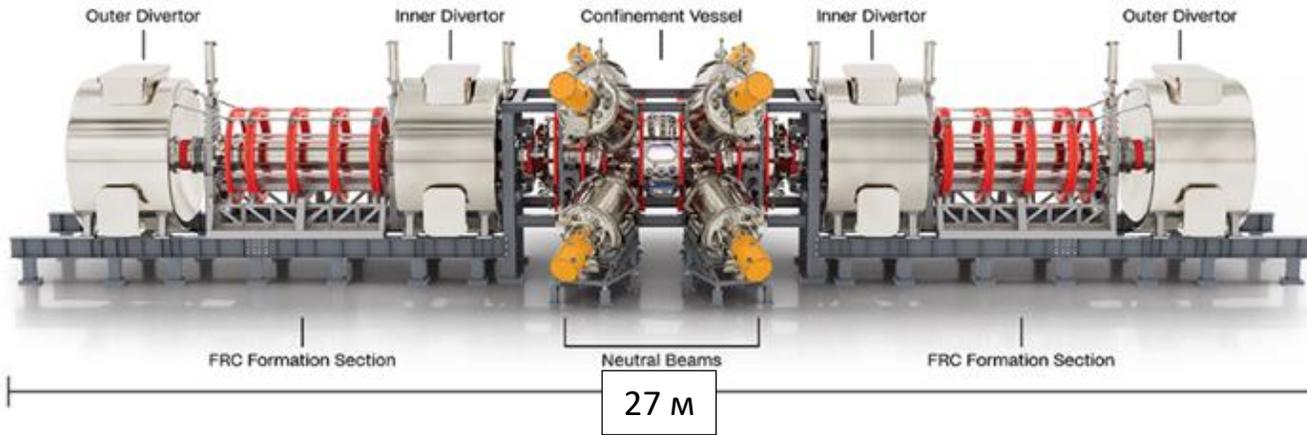
- Ловушки открытого типа в мире
- Мотивации для развития проекта ГДМЛ
- Общий вид и параметры установки
- Ключевые проблемы на пути к реактору
- Магнитная система и вакуумная камера центральной ячейки ГДМЛ
- Магнитная пробка на основе ВТСП
- Расширитель
- Система атомарной инжекции
- Система ЭЦР-нагрева электронов
- Заключение

Основные действующие открытые ловушки

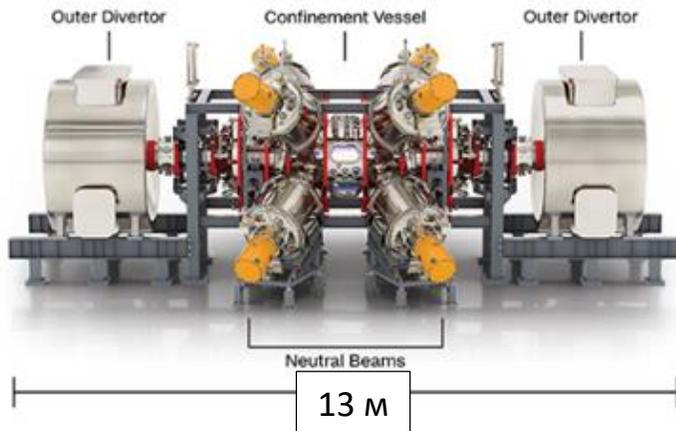


TAE Technologies: частный путь к термояду

до 2024: установка **Norman**, пятое поколение установок TAE, открытая ловушка с созданием плазмы при слиянии двух FRC.



2025: установка **Norm**, шестое поколение установок TAE, конфигурация открытой ловушки без FRC.



Trump Media & Technology Group to Merge with TAE Technologies, a Premier Fusion Power Company, in All-Stock Transaction Valued at More Than \$6 Billion

Sarasota, Fla. & Foothill Ranch, Calif. – December 18, 2025

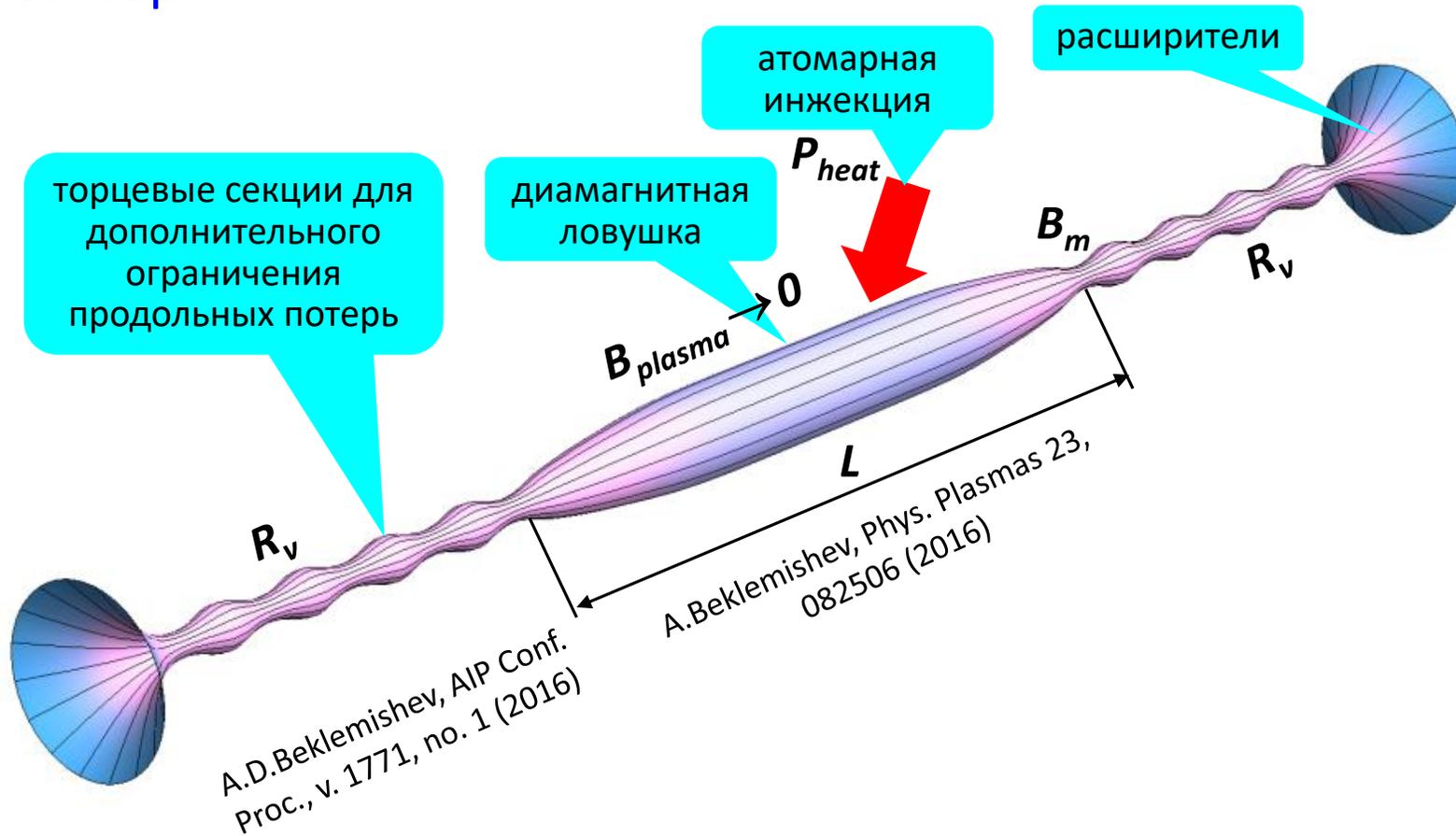
- Trump Media & Technology Group Corp. and TAE Technologies, Inc. today announced the signing of a definitive merger agreement to combine in an all-stock transaction valued at more than \$6 billion. ...
- In 2026, the combined company plans to site and begin construction on the world's first utility-scale fusion power plant (50 MWe) ...
- As part of the transaction, TMTG has agreed to provide up to \$200 million of cash to TAE at signing and an additional \$100 million is available upon initial filing of the Form S-4.

<https://tae.com/trump-media-and-technology-group-to-merge-with-tae-technologies/>

Da Vinci: TAE's first prototype commercial power plant



Мотивация для развития проекта ГДМЛ – термоядерный реактор



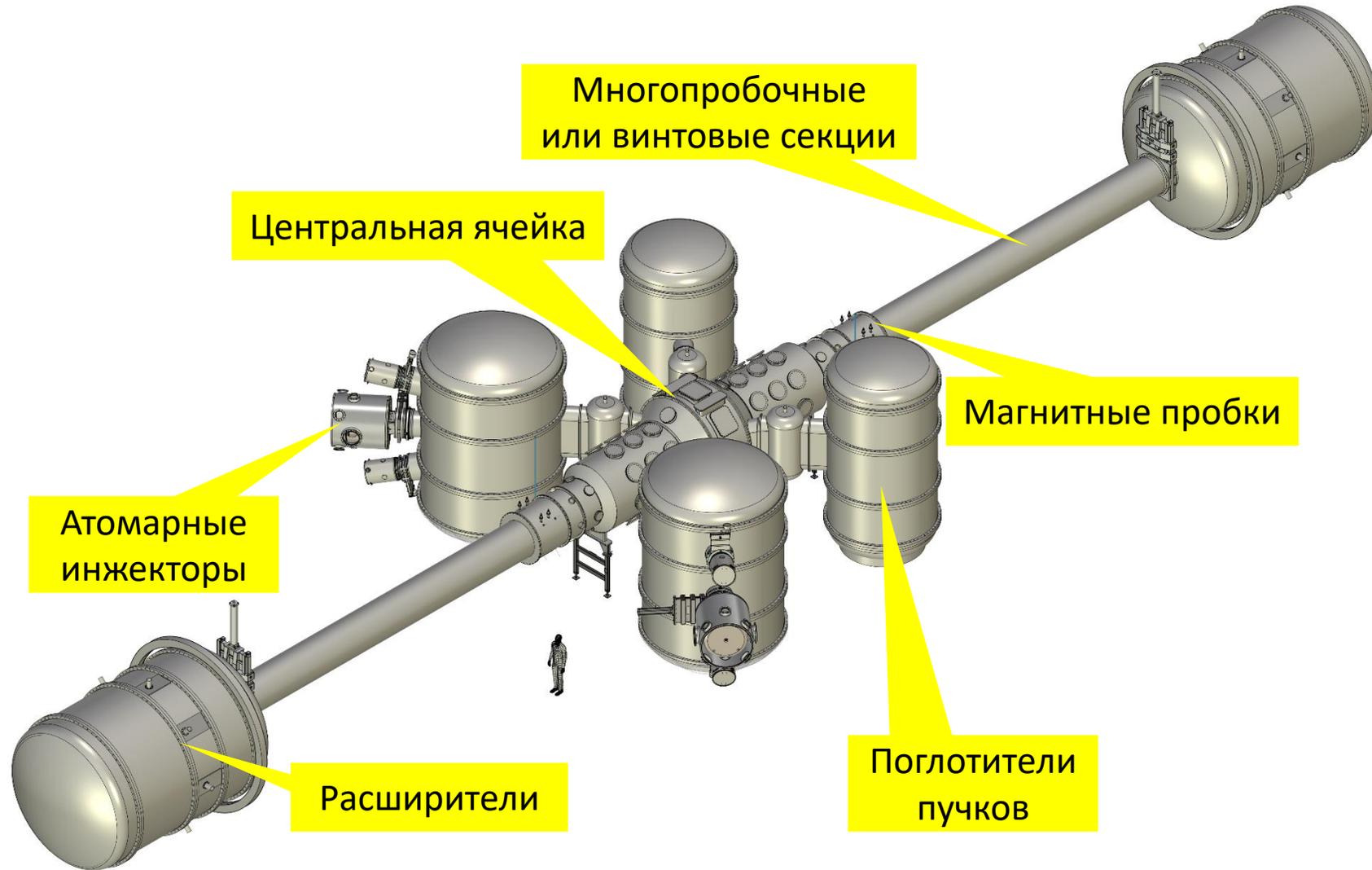
В качестве торцевых ограничителей продольных потерь мы рассматриваем многопробочные секции с прямой или винтовой магнитной конфигурацией, откуда и возникло название «Газодинамическая многопробочная ловушка» (ГДМЛ).

M. Moyzykh et al., "VOYAGER fusion commercial power plant concept with open trap plasma confinement", accepted for publication in Journal of Plasma Physics

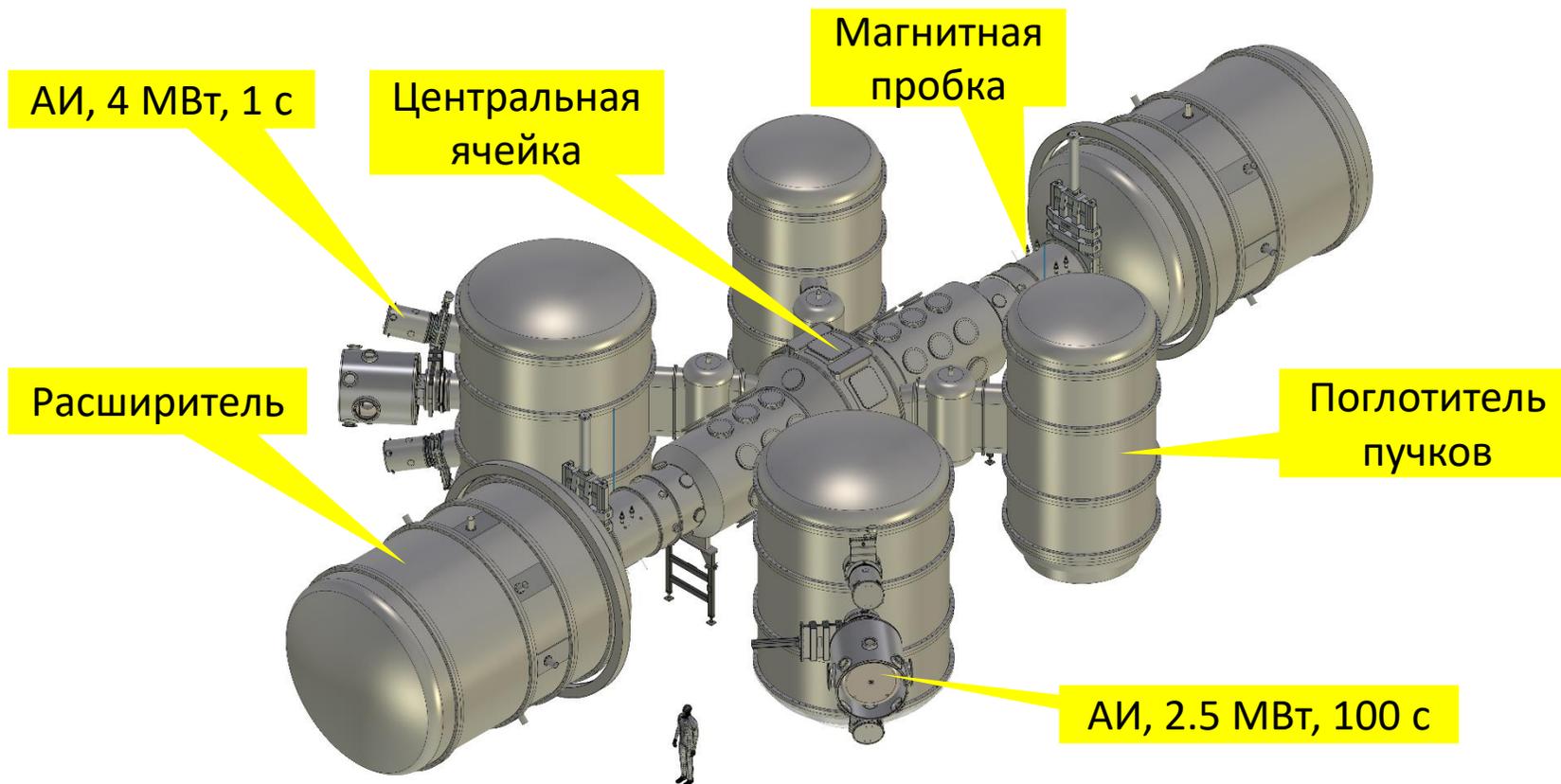


- Центральная ячейка — диамагнитная ловушка, «зажигание», мощность 3 ГВт, длина центральной части 100 м, радиус плазмы 1 м.
- D-T реактор: удерживается 40% альфа-частиц, подавление продольных потерь в **100** раз.
- D-D реактор: дожигание трития, удерживаются почти все заряженные продукты реакций, отражается от стенок и поглощается плазмой 70% циклотронного излучения, подавление продольных потерь в **3800** раз.

3D-модель ГДМЛ в полном объеме



3D-модель ГДМЛ первой очереди

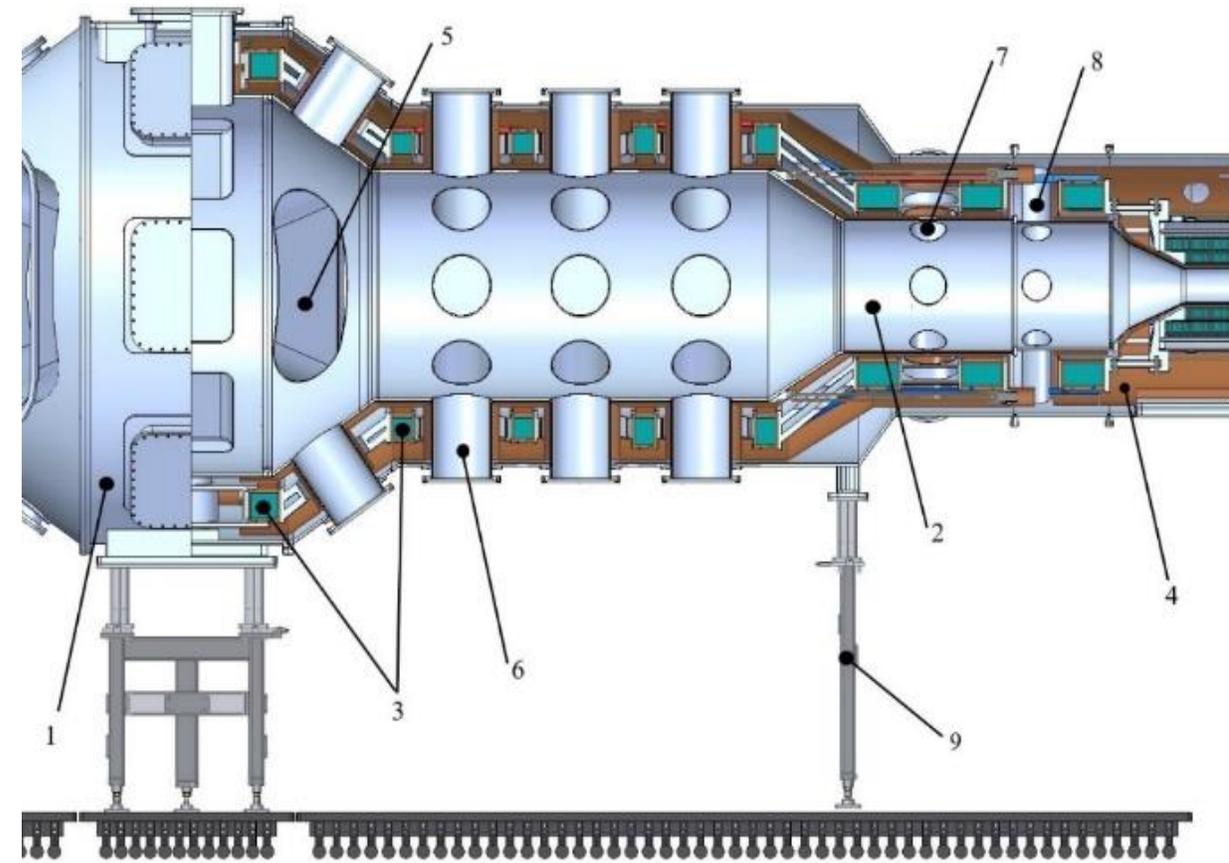
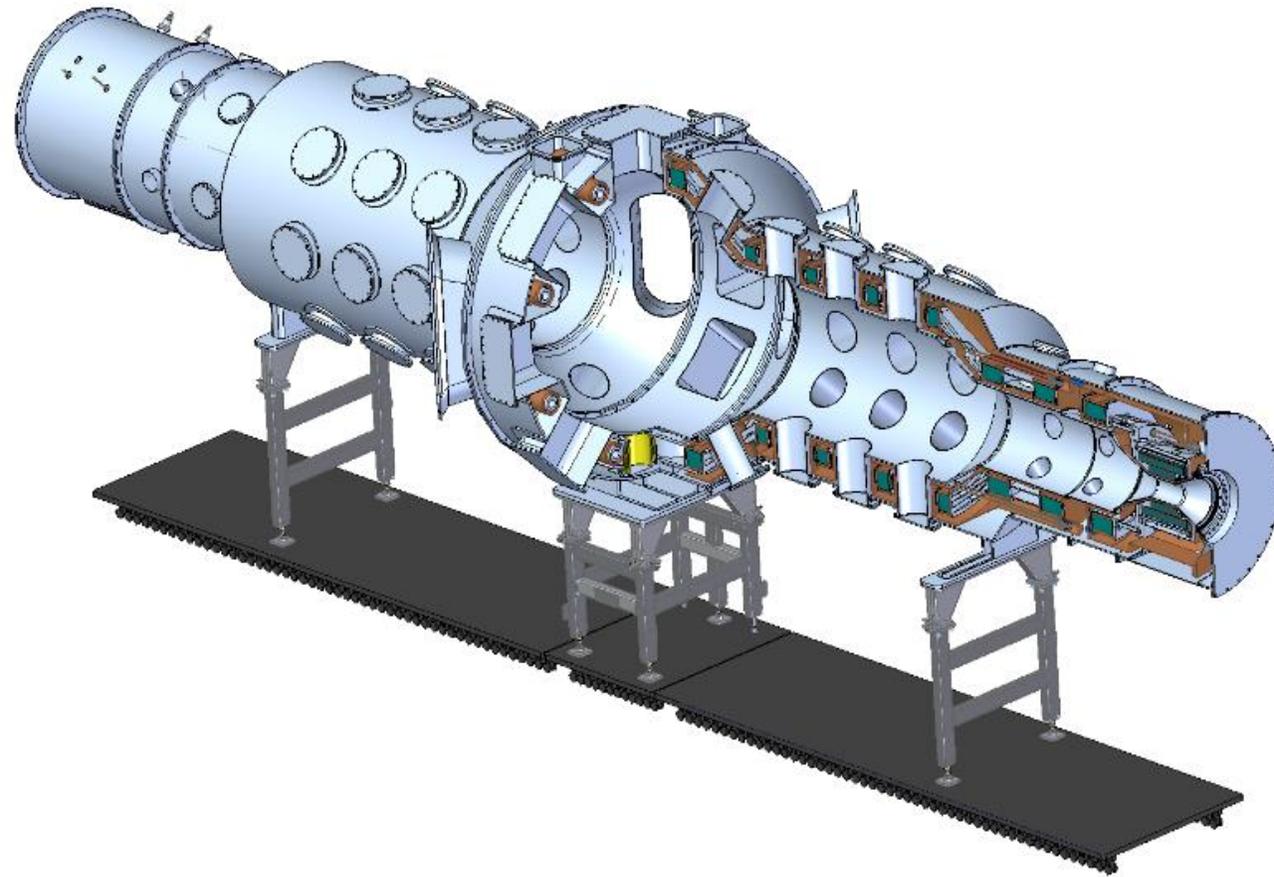


| Параметр | Значение |
|------------------------------|---------------|
| Расстояние между пробками | ~10 м |
| Радиус плазмы | 10 – 30 см |
| Магнитное поле: | |
| в центре | 0 – 1.5 Тл |
| в пробках | ~12 (20) Тл |
| Атомарная инжекция (H^0) | |
| суммарная мощность | ~ 20 МВт |
| длительность работы | ~1 с |
| мощность | ~5 МВт |
| длительность работы | ~100 с |
| энергия нейтралов | 40 кэВ |
| Дополнительный ЭЦРН: | |
| частота | 170 ГГц |
| суммарная мощность | 2 МВт |
| длительность импульса | ~10 с |

Ключевые проблемы на пути к реактору

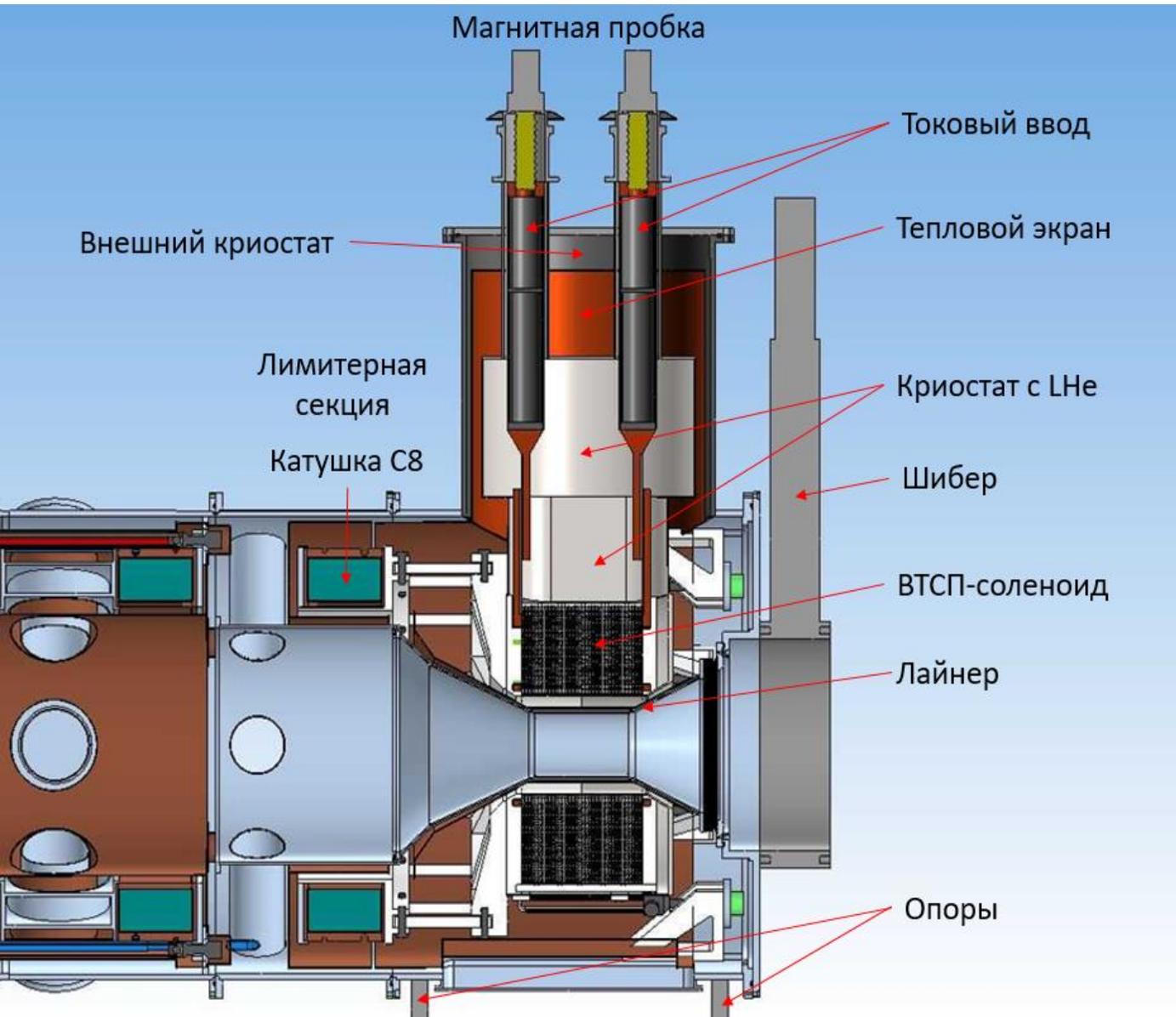
1. Продольное удержание энергии
 - a. Обоснование эффективности диамагнитного удержания
 - b. Обоснование эффективности многопробочного удержания
2. МГД-стабилизация плазмы в стационарных условиях со значительным ограничением продольных потерь и высоким диамагнетизмом
3. Стабильное удержание относительно кинетических мод
4. Поперечный транспорт
5. Сценарий старта

Магнитная система и вакуумная камера центральной ячейки



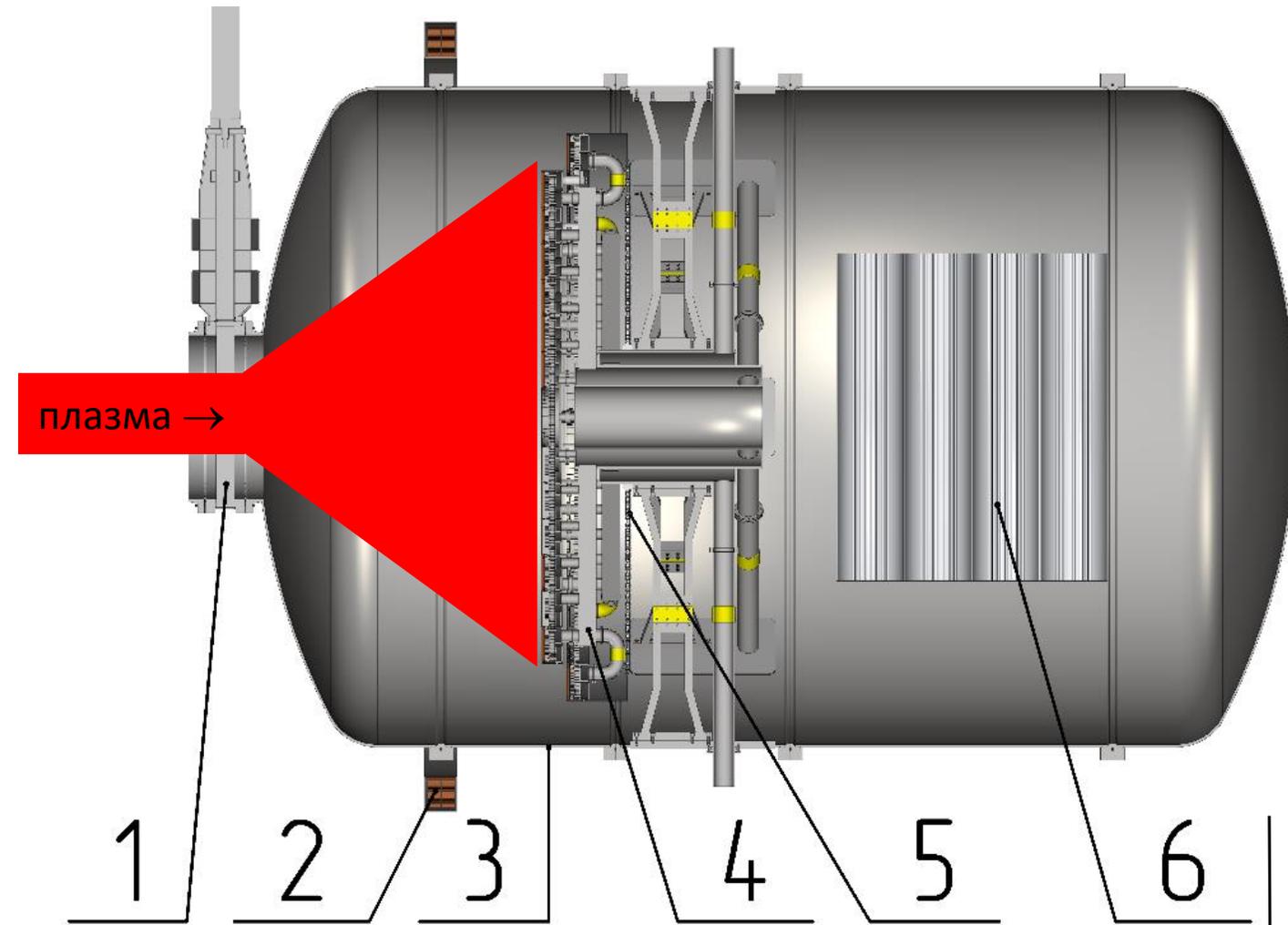
Общий вид криостата магнитной системы ГДМЛ: слева – общий вид, справа - в разрезе. 1 – корпус криостата, 2 – вакуумная камера, 3 – сверхпроводящие катушки из NbTi, 4 – защитный экран, 5 – патрубок нейтральной инжекции, 6 – диагностические порты, 7 – порты для ввода СВЧ-пучков, 8 – порты для доступа к лимитеру, 9 – опорная стойка криостата

Магнитная пробка



Подготовлено техническое задание и планируется разработка пробочного узла с полем $B_m \approx 15$ Тл на основе низкотемпературных сверхпроводников с использованием разработанных ИЯФ технологий

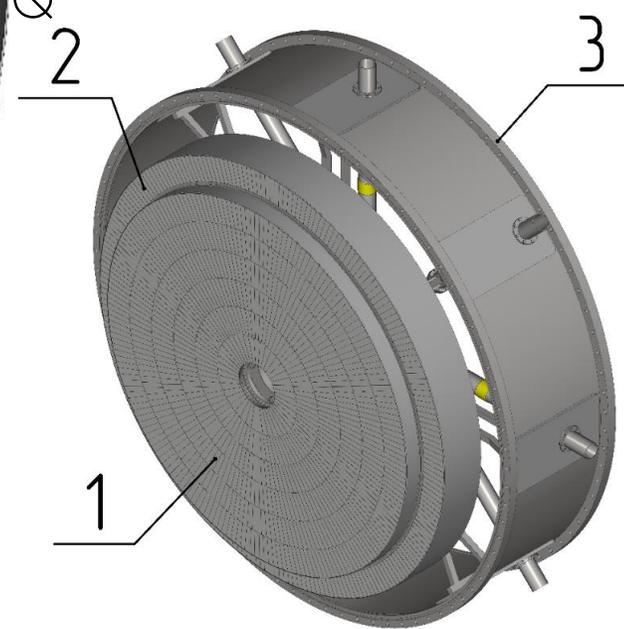
Расширитель



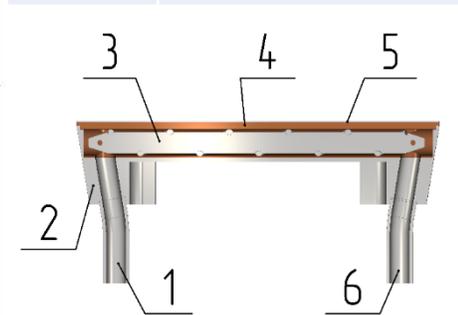
Концевой расширитель ГДМЛ: 1 – вакуумный затвор, магнитная катушка, 3 – вакуумная камера, 4 – приемник плазмы, 5 – электростатический экран, 6 – криогенный вакуумный насос

| Технические требования | |
|---|-------------------------------------|
| Стационарная плотность мощности в потоке плазмы | до 2,5 МВт/м ² |
| Электрическое смещение центрального диска | до 2 кВ |
| Допустимая концентрация нейтрального газа | до 10 ¹⁹ м ⁻³ |
| Скорость вакуумной откачки по водороду | не менее 0,5·10 ⁶ л/с |

Ø 4 м

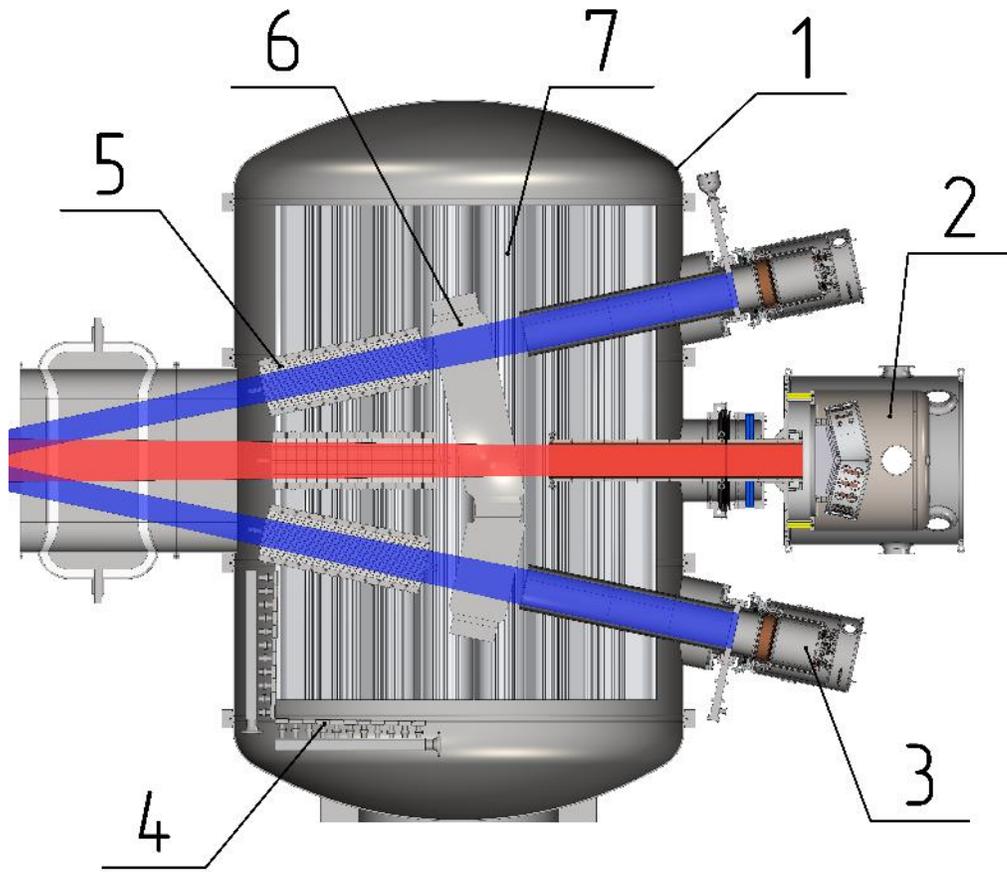


Поглотитель плазмы: 1 – внутренняя приемная зона, 2 – внешняя приемная зона, 3 – вакуумный корпус



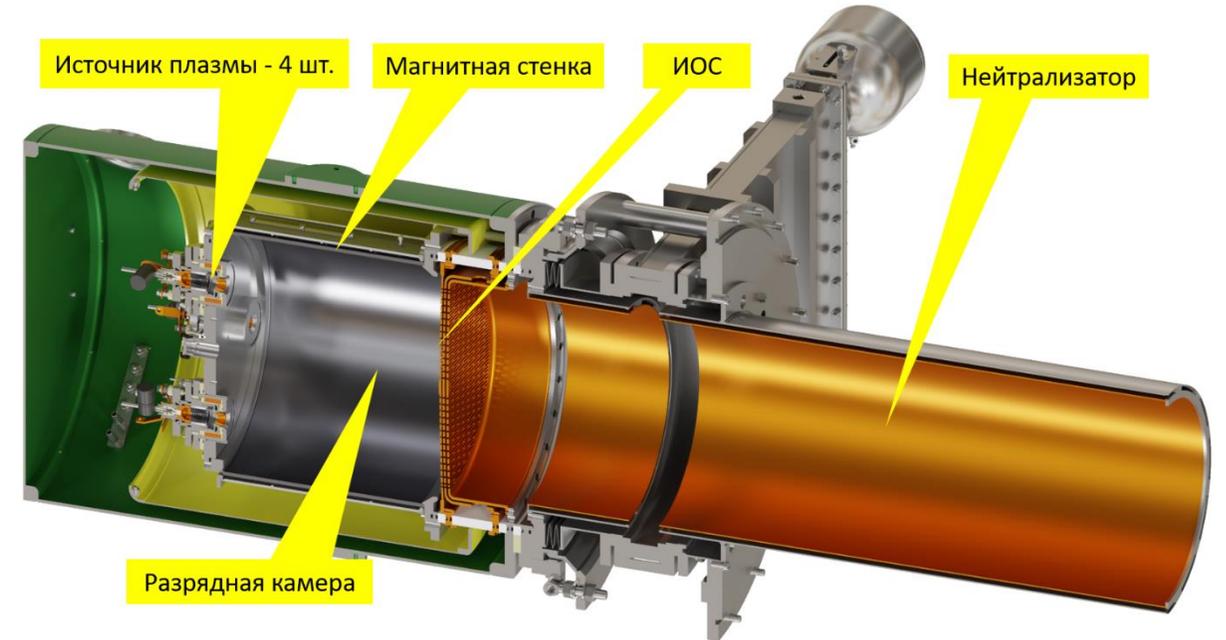
Приемная пластина
1 – входной патрубок, 2 – корпус, 3 – завихритель, 4 – вставка, 5 – молибденовое покрытие, 6 – выходной патрубок

Система атомарной инжекции



Инжекционный модуль установки ГДМЛ:
 1 – вакуумная камера, 2 – источник ионов стационарного пучка, 3 – источник ионов стартового пучка, 4 – приемники неперезарядившихся ионов, 5 – калориметр, 6 – поворотный магнит стационарного и стартовых пучков, 7 – криогенный насос

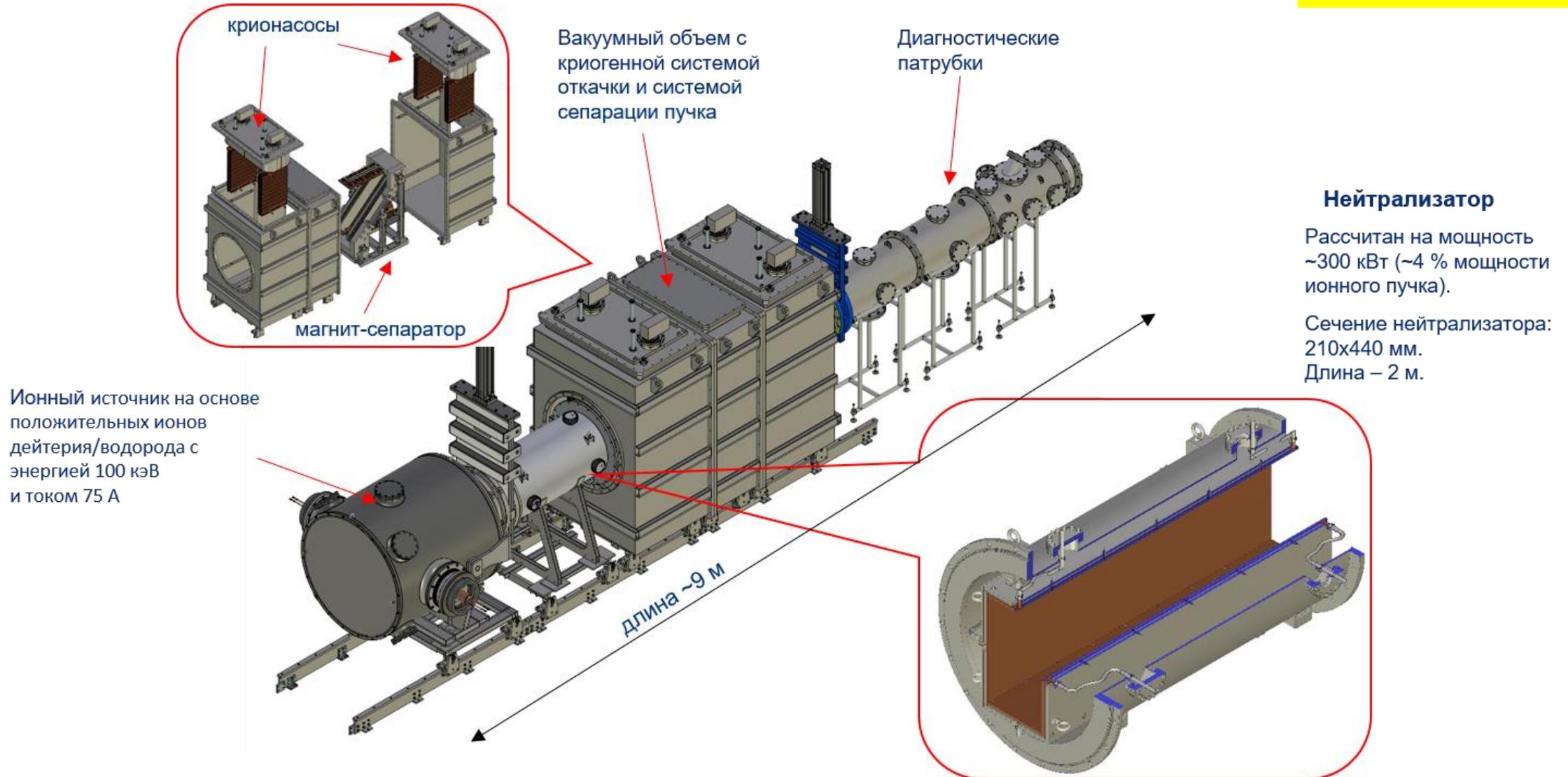
| Параметр | Стартовые пучки | Стационарные пучки |
|----------------------------|-----------------|--------------------|
| Мощность через порт ГДМЛ | 15 МВт | 5 МВт |
| Стабильность энергии пучка | ±5% | ±5% |
| Энергия частиц | 40 кэВ±5% | 40 кэВ±5% |
| Тип атомов | H ⁰ | H ⁰ |
| Длительность импульса | 0,3-1 с | 100 с |



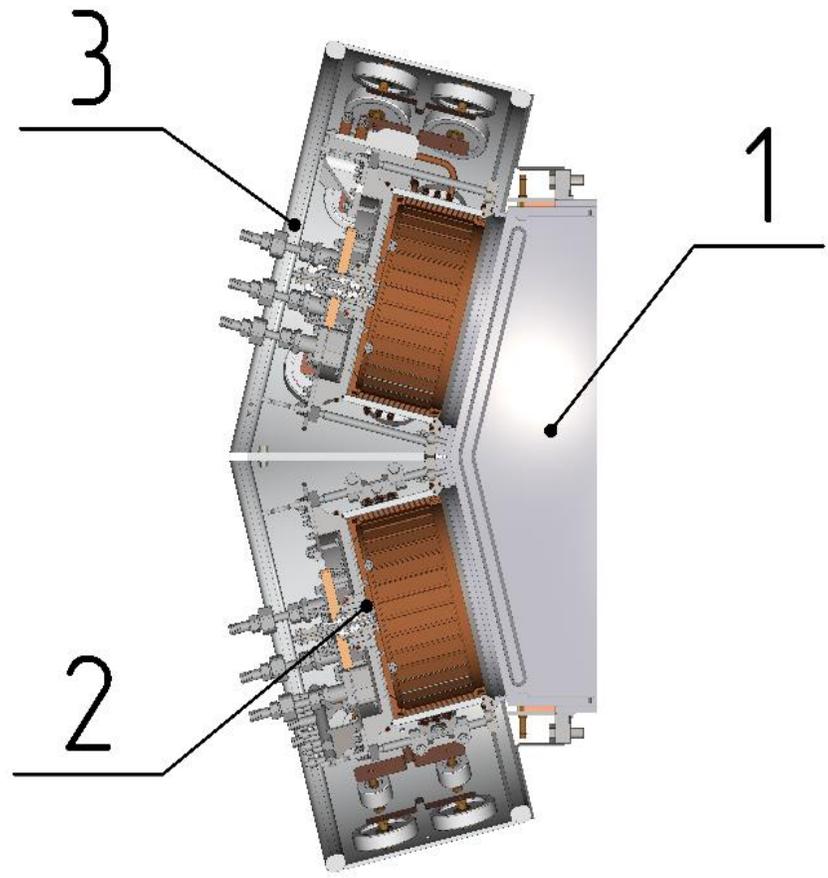
Инжектор стартового пучка
 (отработан при поддержке ФП «Технологии термоядерной энергетики»)

Работы по созданию инжектора стационарного пучка

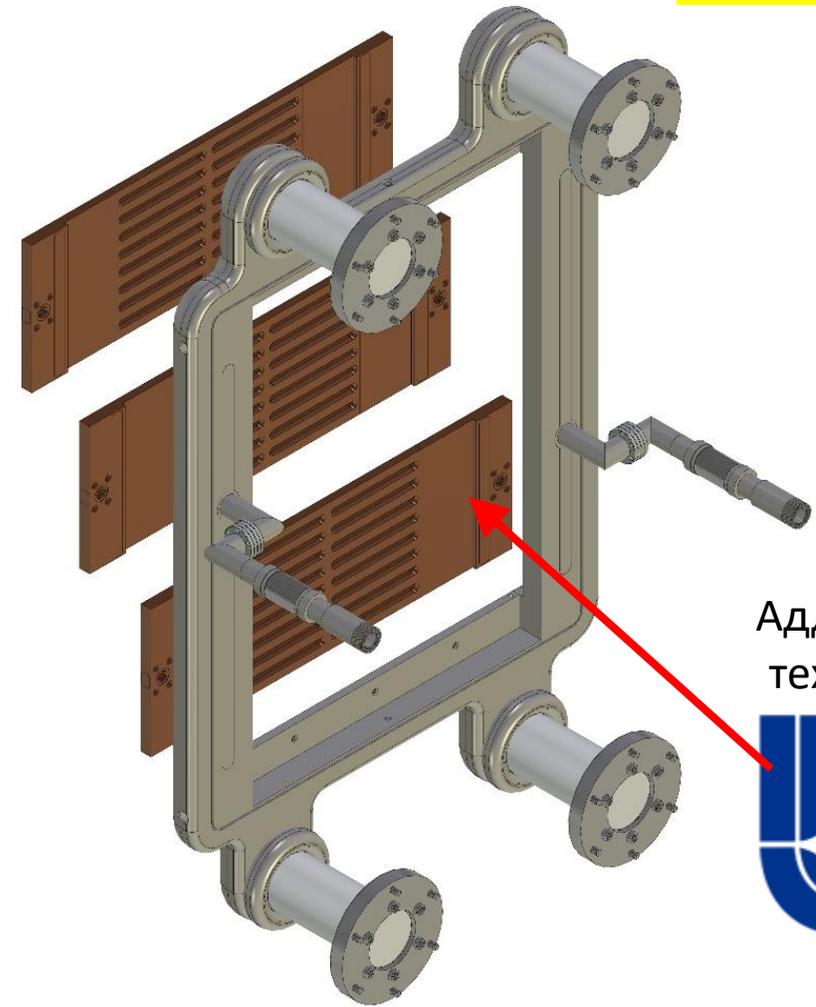
Подробности в докладе
И.В. Шиховцева



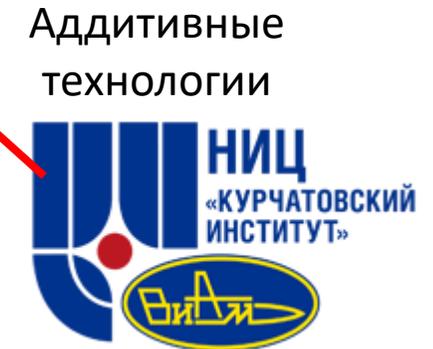
В лаб. 9-0 в рамках ФП «Технологии термоядерной энергетики» в 2026 году будет создан стенд для отработки технологий генерации атомарного пучка H^0 с мощностью до 3 МВт и энергией частиц до 100 кэВ.



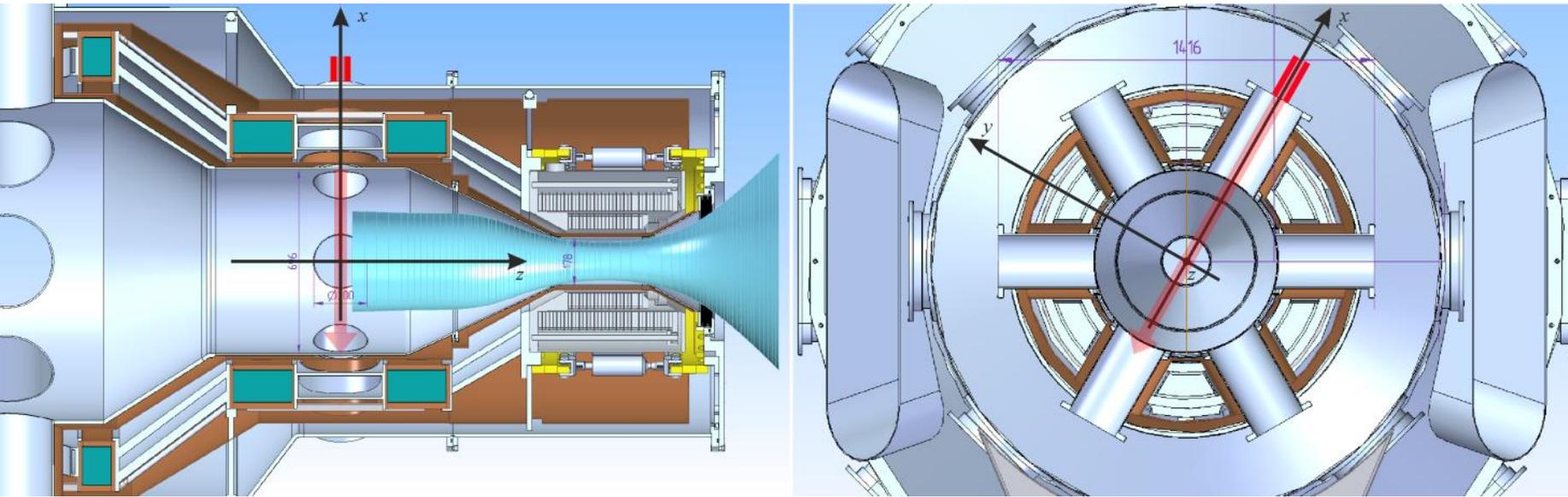
Источник плазмы инжектора
стационарного пучка:
1 – расширительная камера, 2 – ВЧ-
драйвер, 3 – электростатический экран



Расположение сегментов на коллекторе и
конструкция сегмента электрода
стационарного источника ионов



Система ЭЦР-нагрева электронов



Пробочный узел ГДМЛ. Красным эскизно изображена схема ЭЦР нагрева плазмы: СВЧ-излучение из открытого конца линии передачи вводится поперек оси системы

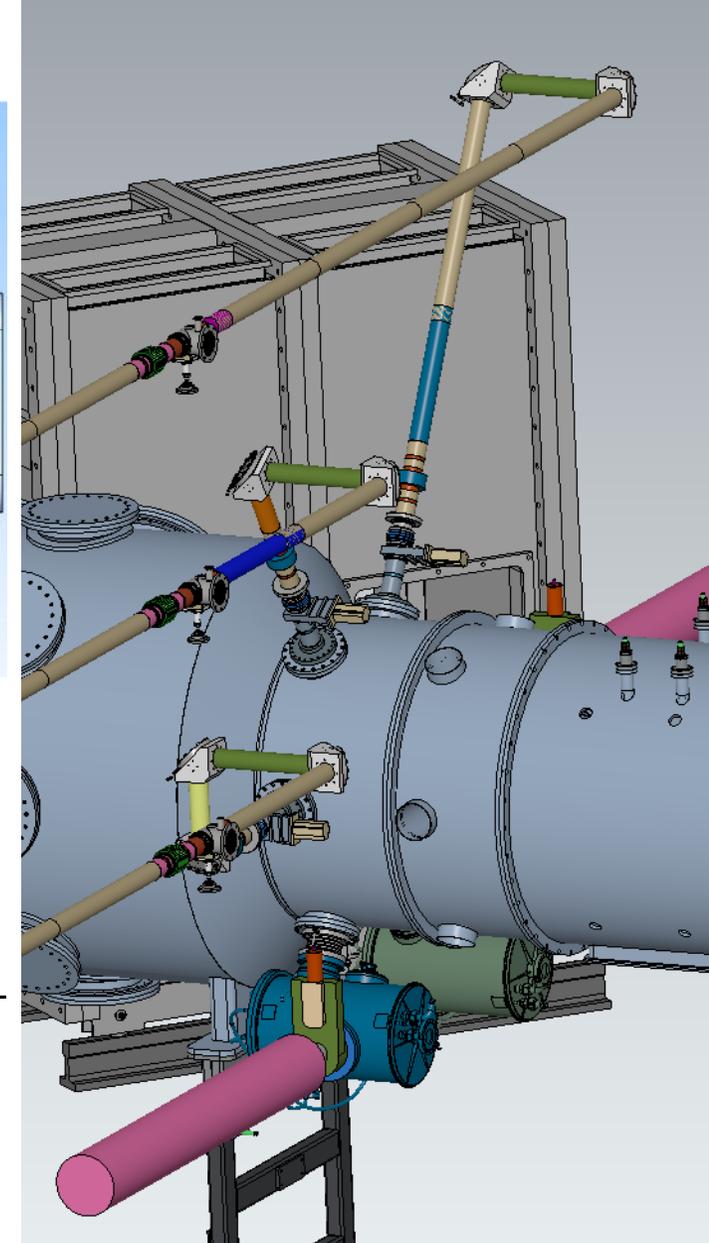
Планируем использовать 3 гиротрона с частотой 170 ГГц и суммарной мощностью излучения на границе плазмы не менее 2 МВт



Волноводная секция 1 м и фланцевое соединение



Волноводный 90° уголок



Узлы ввода и вывода СВЧ излучения в камеру ГДМЛ

Заключение

В рамках выполнения обязательств ФП «Технологии термоядерной энергетики» в 2025 году проведены следующие работы по созданию технического проекта установки ГДМЛ.

Разработаны технические проекты:

- сверхпроводящей магнитовакуумной системы центральной секции установки ГДМЛ;
- магнитовакуумной системы концевых расширителей.

Выбраны технические решения для:

- элементов стартовых и стационарных источников нейтральных пучков для нагрева плазмы;
- системы СВЧ-нагрева плазмы в электронно-циклотронном диапазоне частот;
- элементов силовых систем питания установки ГДМЛ, включая питание магнитной системы и систем нагрева плазмы;
- определен стартовый набор диагностик плазмы;
- систем управления, сбора, передачи и хранения экспериментальных данных установки ГДМЛ;
- системы вакуумной откачки;
- криогенной системы установки ГДМЛ.

Далее планируется:

- Разработка технического проекта пробочной катушки на основе НТСП с использованием технологий ИЯФ;
- Разработка эскизного проекта сверхпроводящих многопробочных торцевых секций;
- Разработка эскизного проекта сверхпроводящих винтовых секций;
- Разработка технического проекта лимитеров.

Спасибо за внимание!